

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Смирнов Г.В., Смелов В.Г.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Широкому применению электрохимической размерной обработки (ЭХО) в технологиях изготовления деталей из титановых, жаропрочных, нержавеющей и других трудно обрабатываемых металлов и сплавов, мешает ее низкая точность формообразования, которая в определенных случаях, оказывается недостаточной для использования ее в качестве окончательного метода обработки. В связи с этим необходимо увеличивать точность метода ЭХО. Точность метода можно повысить, правильно подобрав состав электролита режимы обработки (плотность тока, анодный потенциал, выход по току, эффективная электропроводность, межэлектродный зазор). В современных условиях производства подбор оптимальных режимов экспериментальным способом экономически не выгоден и долгов. Альтернативным способом определения режимов является математическое моделирование процесса ЭХО. Для этого необходимо иметь формализованное описание процесса ЭХО.

Задача описания процесса формообразования при ЭХО заключается в определении геометрии профильной части пера лопатки в процессе обработки в зависимости от свойств обрабатываемого материала, параметров заготовки и применяемых режимов обработки.

Математическое описание электрохимического формообразования фасонных поверхностей представляет собой систему взаимосвязанных дифференциальных уравнений, аналитических, экспериментальных, функциональных соотношений и краевых условий, описывающих различные аспекты процесса (всего около 30). В общем виде это математическое описание решить невозможно. Поэтому при моделировании ЭХО лопатки для упрощения общего математического описания нами были приняты допущения, ввиду малого влияния отдельных факторов на процесс формообразования. В результате этих допущений упростился процесс решения, и были получены частные математические модели, которые адекватно отражают процесс, происходящий в результате ЭХО.

Для описания процесса в межэлектродном зазоре введем две системы координат подвижную и неподвижную. Приняли поверхность детали в прямоугольной системе координат (рис 1), в которой ось y совпадает с направлением скорости подачи ЭИ (V_k).

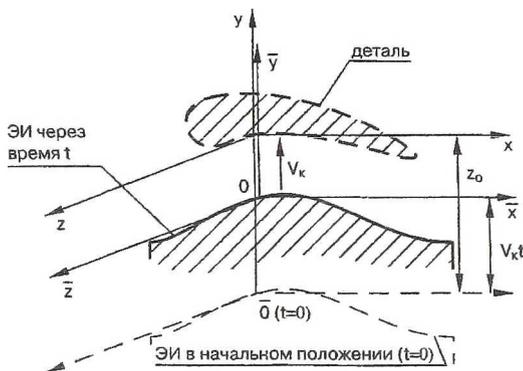


Рис. 1. Система координат принятая для решения задачи электрохимического формообразования

Система уравнений, описывающая процесс формообразования в неподвижных координатах x, y, z имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 I & \begin{cases} \frac{\partial y_a}{\partial \tau} = \eta \frac{k}{\rho} |\chi \text{grad} U|_{y_a} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial y_a}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial y_a}{\partial z}\right)^2} \\ \tau = 0 \quad y = y_0(x, z) \end{cases} \\
 II & \begin{cases} \text{div}(\chi \text{grad} U) = 0 \\ \bar{y} = f(\bar{x}, \bar{z}) \quad U = -\varphi_{\kappa}(i_{\kappa}, \omega, pH) \\ y = y_a(x, z, \tau) \quad U = \nu - \varphi_A(i_a, \omega, pH \dots) \\ y = G_{из}(x, z, \tau) \quad \frac{\partial U}{\partial n} = 0 \end{cases} \\
 III & \begin{cases} \bar{x} = R_1(x, y, z, \tau), \bar{y} = R_2(x, y, z, \tau), \bar{z} = R_3(x, y, z, \tau) \end{cases} \\
 IV & \begin{cases} \chi = \chi(t, \bar{\varepsilon}) \\ \eta = \eta(\varphi_A, \omega, t, pH \dots) \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$V \begin{cases} p = p(x, y, z, \tau) \\ \omega = \omega(x, y, z, \tau) \\ t = t(x, y, z, \tau) \\ \bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}(x, y, z, \tau) \end{cases}$$

Уравнение (I) системы описывает изменение формы детали с начальным условием, описывающем форму заготовки. Здесь η - выход металла по току; k - весовой электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; ρ - плотность обрабатываемого материала; U - электрический потенциал в МЭЗ.

Уравнение (II) системы описывает электрическое поле с учетом поляризации электродов (φ_a, φ_k) и непостоянства электропроводности среды $\chi(x, y, z)$. Здесь $\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{y})$ - уравнение, описывающее форму ЭИ; φ_a, φ_k - потенциалы анода и катода; v - напряжение на электродах; $y = G_{из}(x, z, \tau)$ - уравнение, описывающее форму изолированной части ЭИ.

Уравнение III системы (I - V) описывает трансформацию координат. Для проектирования и анализа технологического процесса более пригодной является система координат, связанная с обрабатываемой деталью, которую обозначим осями x, y, z (рис.1). При неподвижной детали она совмещается с базовой системой координат электрохимического станка и является неподвижной.

С точки зрения удобств расчетов рассмотрели задачу в подвижной системе координат, связанной с ЭИ, которая на рис.1 обозначена осями $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$. Так как форма заготовки $[y=y_0(x, z, 0)]$ задается в неподвижной системе координат x, y, z , а форма ЭИ $\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{z})$ в подвижной $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$, производится трансформация координат на основании уравнений относительного движения электродов.

Группа уравнений IV системы (I - V) описывает изменение выхода металла по току (η), а также изменение электропроводности (χ), которое зависит от распределения температуры (t) и объемной концентрации газа ($\bar{\varepsilon}$).

Группа уравнений V системы (I - V) описывает поля скоростей (ω), давлений (P), температуры (t) электролита и объемной концентрации газа ($\bar{\varepsilon}$). Определение отношений (V) связано с решением дифференци-

альных уравнений в частных производных энерго- и массопереноса, а также теплообмена

В общем виде решение системы уравнений (I – V) даже для простейших случаев обработки невозможно. Главная причина этого заключается, с одной стороны, в том, что недостаточно полно изучены происходящие при ЭХО явления, с другой стороны, в математических трудностях расчета сопряженных трехмерных полей.

В связи с этим необходимо применение упрощенных математических моделей, которые учитывают ранее выявленные главные управляющие воздействия, и пренебрегают второстепенными в заданном приближении. Введем упрощенную модель формообразования «идеального процесса» ЭХО, в основе которой лежат следующие предположения:

1 - закон Ома справедлив во всем объеме МЭЗ, заполненном электролитом;

2 процесс анодного растворения протекает с постоянным η ($\eta = \text{const}$);

3 - поляризация электродов постоянна по всей их поверхности и в течении всего периода обработки ($\varphi_A - \varphi_K = \text{const}$);

4 - электропроводность электролита в МЭЗ постоянна в пространстве и во времени ($\chi = \text{const}$).

При бесконечных плоскостях или в областях, достаточно удаленных от концов электродов, электрическое поле можно принять одномерным, т. е. таким, в котором электрический потенциал зависит только от одной переменной (в нашем случае y), в таком МЭЗ распределение φ линейно. После принятых допущений и проведенных преобразований, получили уравнение движения точек детали при ЭХО в дифференциальном виде

$$\frac{\partial y_a}{\partial \tau} = \eta \frac{k}{\rho} \chi \frac{V - \varphi_A + \varphi_K}{y_a - \psi(\tau)},$$

где $\psi(\tau)$ – уравнение движения ЭИ вдоль оси y .

Для интегрирования уравнения необходимо определить функцию $\Psi(\tau)$, описывающую движение ЭИ применительно к импульсной ЭХО. При обработке заготовки по импульсно-циклической схеме технологический ток подается пакетами импульсов регулируемой длительности, а движение электрода-инструмента осуществляется по схеме - подвод «ощупывание» - отвод на рабочее расстояние – пакет импульсов тока

(обработка) – отвод промывочное расстояние – промывка электролитом – подвод «ощупывание» -

Во время прохождения импульса ЭИ остается неподвижным и, учитывая малую толщину слоя, снимаемого при прохождении одного импульса, представим процесс растворения поверхности можно представить проходящим без изменения МЭЗ, т. е. функция $\Psi(\tau)=0$.

Интегрируя уравнение дифференциальное уравнение с учетом начального условия, получаем

$$y_a = \sqrt{y_0^2 + 2A\tau},$$

где $A = \eta \frac{k}{\rho} \chi(v - \varphi_A + \varphi_K)$ - характеристика режима - величина, характеризующая ЭХО неподвижным ЭИ.

Расчеты проводим в следующей последовательности. Перед прохождением пакета импульсов в каждой точке рассчитываем величину МЭЗ, по которому определяем характеристику режима А. Далее рассчитываем новые координаты точек профиля и их положение относительно поля допуска. Перед прохождением следующего пакета импульсов расчеты повторяем. Обработку прекращаем при достижении хотя бы одной точки профиля пера лопатки границы допуска, указанного в рабочем чертеже.

Информацию о геометрии детали (координатах точек пера) можно вносить с клавиатуры но для получения более достоверных результатов целесообразно информацию о геометрии детали получать из 3D модели созданной конструктором. Это возможно при использованием международных обменных файлов IGES, STEP.

Разработанная модель позволяет:

- определить геометрические параметры заготовки, оптимизировать состав электролита, путем проверки каждого его варианта на имитационной модели, режимы обработки, обеспечивающие обработку заготовки в соответствии с ТТ чертежа по точности геометрических параметров и взаимного расположения пера лопатки;

- определить геометрию электрода-инструмента, обеспечивающего получение лопатки в соответствии с ТТ по точности с учетом деформации пера и изменения режимов обработки под действием внешних и внутренних возмущающих факторов.